

宇宙で動物プランクトンを培養できるのか？ ～微小重力環境下でのカイアシ類の摂餌速度～

高山佳樹^{1*}、秋月真一²

1) 横浜国立大学大学院環境情報研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

2) 創価大学大学プランクトン工学研究所 〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

Can zooplankton be cultivated in space? ~Ingestion rate of copepods under microgravity environment~

Yoshiki Takayama^{1*}, Shinichi Akizuki²

1) *Graduate School of Environment and Information Science, Yokohama National University, 79-7, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, Kanagawa, 240-8501, Japan*

2) *Institute of Plankton Eco-engineering, Soka University, 1-236 Tangi-cho, Hachioji, Tokyo 192-8577, Japan*

* *Corresponding author: takayama-yoshiki-fb@ynu.ac.jp*

2025年6月7日受付, 2025年7月13日受理

Abstract For the long-term human habitation planned on the Moon and Mars, efficient recycling and supply of essential life-supporting materials will be crucial. Fish aquaculture has been proposed as a potential source of animal protein in such closed environments. One proposed approach involves utilizing the nutrients in aquaculture wastewater to cultivate microalgae, which serve as feed for zooplankton, which in turn become food for fish. To implement this food chain in a closed space environment, it is critical to determine whether the feed organisms can grow and reproduce normally under microgravity conditions. Previous studies have investigated the swimming behavior of the zooplankton *Daphnia magna* under various gravity conditions using parabolic flight experiments. The present study aims to clarify how microgravity affects the feeding rate—an important factor influencing reproduction and growth—of marine zooplankton. Feeding experiments were conducted using the two marine copepods, *Acartia steueri* and *Tigriopus japonicus*.

Zooplankton samples were collected using a plankton net from Manazuru Port, located in the western part of Sagami Bay. Adult females of *Acartia steueri* were identified and selected for use in the experiments. The microalga *Thalassiosira weissflogii*, cultured in f/2 medium, was used as the food source at concentrations sufficient to saturate the feeding rate. Two treatments were prepared: an experimental group containing both algae and copepods, and a control group containing only algae. These were incubated for 24 hours under two gravity conditions: normal Earth gravity (1 g) and simulated microgravity (1/1000 g, equivalent to that on the International Space Station). Microgravity conditions were simulated using a 3D clinostat, which rotates the sample

in three dimensions to cancel the gravity vector. For the 1 g condition, the containers were kept stationary in an incubator and manually agitated every 4 hours. After incubation, changes in algal cell density were measured and feeding rates were calculated. Additionally, chlorophyll a content in the guts of the copepods was extracted using N,N-dimethylformamide and measured.

Adult female *Acartia steueri* and *Tigriopus japonicus* fed on *T. weissflogii* and produced fecal pellets under both gravity conditions. Comparison of ingestion rates of *A. steueri* and *T. japonicus* revealed no significant differences between the 1 g and simulated microgravity conditions ($p > 0.05$). Similarly, no significant difference was found in the gut chlorophyll a content of *A. steueri* at the end of the experiment (t -test, $p > 0.05$). These results suggest that, under the conditions tested, *A. steueri* and *T. japonicus* can maintain feeding activity comparable to that under Earth gravity even in a 1/1000 g microgravity environment. Future studies should assess how microgravity affects other biological processes such as reproduction and growth rates.

Keywords: clearance rate, gut pigment, marine copepods, microgravity, space aquaculture

将来計画されている月や火星における人間の長期滞在のためには、生命活動に必要な物質の効率的な循環供給が必要となる。動物性タンパク質の供給源として魚類養殖が期待されており、養殖排水に含まれる栄養塩類にて微細藻類を培養し、それを餌に動物プランクトンを育て、そして魚類の餌料にするプロセスが提案されている (竹内ら 1997, 遠藤・竹内 2013)。宇宙閉鎖環境下において、食物連鎖を制御しながら魚類養殖を行う場合、微小重力環境で餌生物が正常に増殖できるかどうか成功の鍵となる。動物プランクトンにおいてはこれまで、航空機による曲線飛行によって数十秒間の微小重力環境をつくり出し、その際の *Daphnia magna* の遊泳行動が観察されている (Endo et al. 2011, 遠藤・竹内 2013)。動物プランクトンの個体群の増殖は、摂餌や交尾、卵生産や発生、成長・発達 (脱皮や変態) のプロセスを経るため、微小重力環境がこれら増殖因子に与える影響を理解する必要があるが、これらの評価には数時間～数日程度の一定期間の培養実験を行う必要がある。そこで本研究では、三次元の回転で重力を均等分散することで簡便に微小重力環境を再現可能なクリノスタット重力制御装置を用いることとした。本研究では予備的な検討として、動物プランクトン個体群の増

殖における基本的な因子である摂餌速度が微小重力環境においてどのように変化するのかを明らかにすることを目的とし、海産カイアシ類を対象に摂餌実験を行った結果を報告する。

本研究では海産カイアシ類の中でも浮遊性種の *Acartia steueri* と底生性種の *Tigriopus japonicus* を対象とした。*Acartia* 属カイアシ類は多くの魚種の仔稚魚にとって適した体サイズ、遊泳行動、生化学組成を示すことから理想的な水産生物餌料とされている (Hansen et al. 2016)。*A. steueri* は自然環境下においては水産重要魚種の仔稚魚の重要な餌資源となっており (Tanaka et al. 1987)、集約的な大量培養を目指した一連の研究対象種とされている (Takayama et al. 2021, Takayama et al. 2023)。*T. japonicus* は高密度培養が可能であり (Koga et al. 2022)、栄養強化を施さなくても魚類仔稚魚の生育にとって十分な必須脂肪酸および栄養価を有していることが報告されている (福所ら 1980, Hagiwara et al. 2016)。実験に用いた *A. steueri* 雌成体は相模湾西部に位置する真鶴港内にて 2023 年 4 月に目合い 180 μ m の動物プランクトンネットで採集された。実験に用いた *T. japonicus* 雌成体は相模湾三ツ石海岸において 2019 年 4 月に単離後、2024 年 6 月まで継代維持した個体

群から得られた。微細藻類餌料には f/2 培地で培養した珪藻 *Thalassiosira weissflogii* を用い、実験時に給餌する餌濃度は摂餌速度が飽和する十分濃度とした。海水で満たした容量 50 mL のガラス製溶存酸素瓶内に餌料藻類と雌成体をいれた実験区と、雌成体をいれない対照区を設け、各重力環境下で 25°C、暗所下のインキュベーター内にて 24 時間にて培養し、培養前後の海水のクロロフィル *a* 濃度を蛍光測定装置 (Trilogy, Turner Designs) にて測定した。得られたクロロフィル *a* 濃度を用い、Frost (1972) に従い摂餌速度と濾水速度を計算した。微小重力条件 (1/1000 g; 国際宇宙ステーション相当) ではクリノスタット重力制御装置 (Gravite, Space Bio-Laboratories) を用い、試料を三次元的に回転させることで微小重力環境を模擬的に再現した。地球重力条件 (1 g) は培養容器をインキュベーター内に静置し 4 時間毎に転倒攪拌を行った。*T. japonicus* に

関しては上述の静置での地球重力条件に加えて、攪拌の有無の影響をみるため 5 rpm で 1 方向に回転するローラーシェーカー (ROLLER 10 digital, IKA) による地球重力条件 (1 g) での実験も行った (Table 1)。各重力条件でカイアシ類が摂餌した植物プランクトンの量を直接評価するため、*A. steueri* のみを対象に消化管内のクロロフィル *a* 量の測定を、Takatsuji et al. (1997) に従い下記の手順で行った。培養終了後、*A. steueri* 雌成体を濾過海水で洗い、2 mL の N,N-ジメチルホルムアミドにて 1 個体ずつ消化管内のクロロフィル *a* 色素を抽出し、蛍光測定装置 (Trilogy, Turner Designs) にて測定した。各実験条件間の摂餌速度、濾水速度、消化管クロロフィル *a* 含量の有意差検定には、*A. steueri* には t-test を、*T. japonicus* には ANOVA を使用し、*p* 値が 0.05 以下を有意とした。

実験に用いたカイアシ類 *A. steueri* と *T. japonicus* の雌成体は、地球重力 (1 g) と微小重力 (1/1000 g; 国際宇宙ステーション相当) の両条件において珪藻 *Thalassiosira weissflogii* を摂餌し、糞粒の生産が確認された。両条件の摂餌速度を比較したところ、*A. steueri* と *T. japonicus* 両種において全ての条件間で有意差は認められなかった (Fig 1a, Fig 2a)。濾水速度についても、*A. steueri* と *T. japonicus* 両種において全ての条件間で有意差は認められなかった (Fig 1b, Fig 2b)。培養実験終了時点での *A. steueri* の消化管内ク

Table 1. Experimental target species of marine copepod and gravity conditions in the present study.

Species	Gravity condition		
	1 g (static)	1 g (shaker)	1/1000 g (clinostat)
<i>Acartia steueri</i> (planktonic copepod)	✓	—	✓
<i>Tigriopus japonicus</i> (epibenthic copepod)	✓	✓	✓

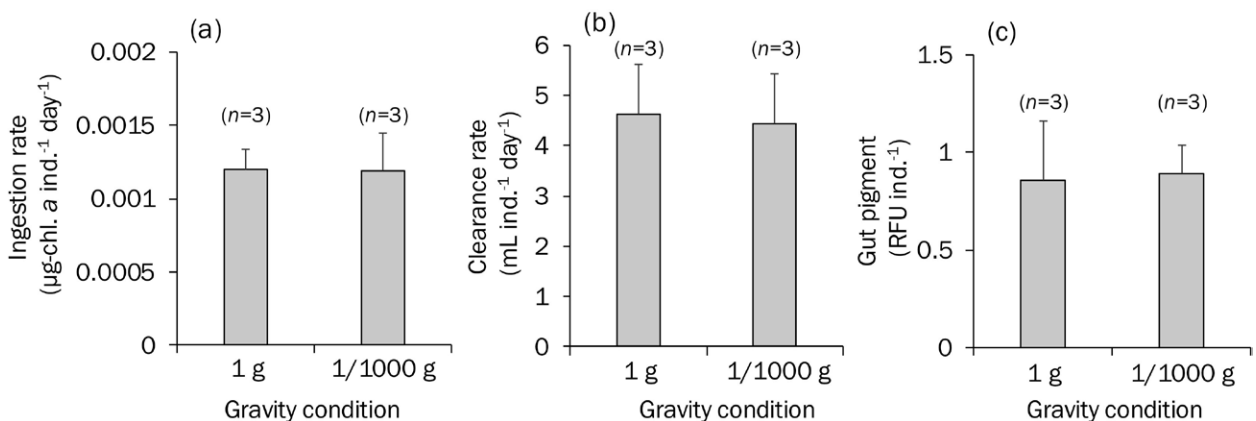


Fig 1. (a) Ingestion rate, (b) clearance rate and (c) gut pigment of adult females in marine copepod *Acartia steueri* raised under 1 g (Earth gravity) and 1/1000 g (International Space Station gravity) gravity conditions. No significant difference was detected between conditions (t-test, $p > 0.05$).

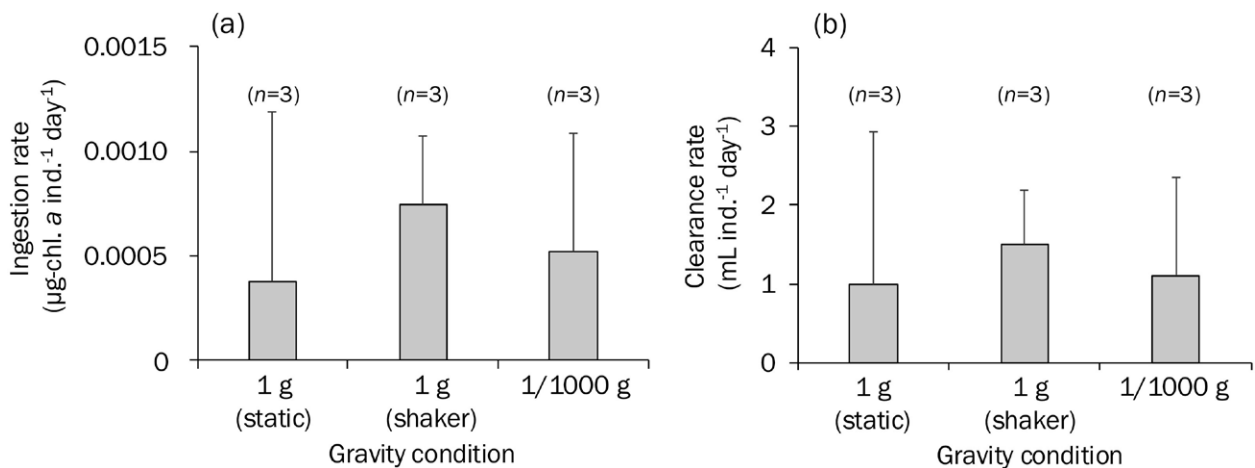


Fig 2. (a) Ingestion rate and (b) clearance rate of adult females in marine copepod *Tigriopus japonicus* raised under static and agitated conditions at 1 g (Earth gravity), and 1/1000 g (International Space Station gravity) gravity conditions. No significant difference was detected among conditions (ANOVA, $p > 0.05$).

クロフィル *a* 含量についても、全ての条件間で有意差は認められなかった (Fig 1c)。以上の結果より、本研究の実験条件においては、1/1000 g の微小重力環境であっても *A. steueri* と *T. japonicus* は摂餌速度を地球重力環境と同程度に維持できるものと示唆された。今後は数日程度の培養実験を行うことで微小重力が再生産速度や孵化率、成長速度等へ与える影響を評価する必要がある。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科研費 (21H03665、21K14902) による助成を受け実施された。

引用文献

- Endo M, Kakimoto N, Kanemaru S, Saitoh M, Omori K, Takeuchi T (2011) Proc. SEE Conf., Tokyo, JPN, p. 49.
- 遠藤雅人, 竹内俊郎 (2013) 閉鎖系における魚類の生産と微小重力の影響. *Int J Microgravity Sci Appl* 30: 111–119.
- 福所邦彦, 荒川敏久, 渡辺武 (1980) 油脂酵母で培養したティグリオプスのマコガレイ仔稚魚に対する餌料価値. *日本水産学会誌* 46: 499–503.
- Frost BW (1972) Effects of size and concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus pacificus*. *Limnol Oceanogr* 17:805–815.
- Hagiwara A, Kotani T, Yoshida T, Soyano K (2016) Production and use of two marine zooplanktons, *Tigriopus japonicus* and *Diaphanosoma celebensis*, as live food for red sea bream *Pagrus major* larvae. *Aquaculture* 452: 120–127.
- Hansen BW, Buttino I, Cunha ME, Drillet G (2016) Embryonic cold storage capability from seven strains of *Acartia* spp. isolated in different geographical areas. *Aquaculture* 457: 131–139.
- Koga S, Takayama Y, Toda T (2022) Suppression of cannibalism in the intertidal copepod *Tigriopus japonicus* (Mori, 1932) and improvements in population density using artificial substrates. *Aquac Fish Fish* 2: 146–150.
- Takayama Y, Hirahara M, Toda T (2021) Bioreactor cultivation of the planktonic copepod *Acartia steueri* Smirnov for egg collection. *Aquac Res* 52: 5912–5917.
- Takayama Y, Yusoff FMD, Toda T (2023) Evaluation of dietary microalgae in the culture of *Acartia steueri* (Copepoda, Calanoida). *J Sustain Sci Manag* 18: 186–198.
- 竹内俊郎, 能登瞬, 吉崎悟朗, 豊部睦, 神吉良二, 小口美津夫, 木部勢至朗, 田仲広明 (1997) 閉鎖生態系循環式養殖システム (CERAS) の開発に関する研究 I. 密閉式魚類飼育装置の開発. *CELSS journal*

- 10: 1–4.
- Takatsuji H, Hamasaki K, Toda T, Taguchi, S (1997) Improved technique for the gut fluorescence method in a feeding study of small zooplankton. *J Plank Res* 19: 159–165.
- Tanaka M, Ueda H, Azeta M (1987) Near-bottom copepod aggregations around the nursery ground of the juvenile red sea bream in Shijiki Bay. *Bull Japan Soc Sci Fish* 53: 1537–1544.